

호주 퀸즈랜드 주 캔닝턴 광상 모암의 아연-침정석-규선석-석류석에 관한 연구: 변성작용과 아연-광화작용에 대해서

Gahnite-Sillimanite-Garnet Mineral Assemblage from the Host Rocks of the Cannington Deposit, North Queensland, Australia: Relationship between Metamorphism and Zn-Mineralization

김 형 수 (Hyeong Soo Kim)*^{1,2}

¹School of Earth Sciences, James Cook University, Townsville, Queensland, 4811, Australia

²강원도 춘천시 강원대학교 지질학과 200-701

(Department of Geology Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon Do 200-701)

요약: 연구는 호주 퀸즈랜드 주 북서부에 위치하는 은-납-아연 캔닝턴 광상은 호상편마암, 미그마타이트, 규선석-석류석 편암 그리고 각섬암으로 구성된 모암 주변부에서 발달해 있다. 모암에서 산출되는 규선석의 세 가지 다른 결정형태, 규선석을 포획광물로 함유한 아연-침정석과 석류석 반상변정은 모암의 변성작용과 아연과 관련된 광화작용에 대한 지질학적 지시자로 사용되었다. 변성작용과 아연 광화작용과의 관계는 프로그램 THERMOCALC를 이용하여 KFMASH ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$), KFMASHTO ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$), NCKFMASH ($Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) 그리고 MnNCKFMASH ($MnO-Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) 화학계에서 이들 세 가지 광물의 공생관계와 규선석-석류석-부분용융의 상평형 관계를 이용하여 결정하였다. MnNCKFMASH와 NCKFMASH계에서 부분 용융은 KFMASH와 KFMASHTO계에서 보다 낮은 온도에서 일어나며, MnNCKFMASH 계에서 용융 온도는 암석 화학 성분의 $Na/(Na+Ca+K)$ 의 비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 캔닝턴 광상의 모암은 MnNCKFMASH계의 경우 최고 온도와 압력 환경에서($634 \pm 62^\circ C$, 4.8 ± 1.3 kbar) 약 15% 용융되지만, KFMASHTO계하에서는 부분 용융이 일어나지 않는다. 규선석의 등변성도선과 모드 비의 변화를 근거로, 주상과 능면형의 규선석과 주상의 규선석을 포획하는 아연-침정석 반상변정은 부분 용융을 포함하는 온도와 압력의 증가(약 $550 \sim 600^\circ C$, $2.0 \sim 3.0$ kbar에서 $700 \sim 750^\circ C$, $5.0 \sim 7.0$ kbar)로 인한 것으로 생각된다. 또한 이와 같은 변성작용 동안의 최대 수축 변형 방향은 남-북 그 다음 동서 방향으로 주로 D_1 과 D_2 변형작용 동안에 형성되어졌다. 결론적으로 아연-침정석의 성장과 관련된 아연 광화 작용은 D_2 동안에 일어났고, 그 후 부분 용융과 후기 변형/변성작용에 의해 재배치 또는 재농집 되어진 것으로 생각된다.

주요어 : 캔닝턴 은-납-아연 광상, 아연-침정석, 규선석, THERMOCALC, 부분용융

*교신저자: hyeongsoo@yahoo.com

ABSTRACT : The Cannington Ag-Pb-Zn deposit, northwest Queensland, Australia developed around the host rocks composing banded and migmatitic gneisses, sillimanite-garnet schist and amphibolite. Three crystal habits of sillimanite, gahnite (Zn-spinel) and garnet porphyroblasts occurred on the host rocks of the Cannington deposit could be used to delineate metamorphism that closely associated with Zn-mineralization in the deposit. Linkages the metamorphism to Zinc-mineralization is determined in four chemical systems, KFMASH ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$), KFMASHTO ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$), NCKFMASH ($Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) and MnNCKFMASH ($MnO-Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$), using THERMOCALC program (version 3.1; Powell and Holland 1988). Partial melting in MnNCKFMASH and NCKFMASH systems occurs at lower temperature than in the KFMASH and KFMASHTO systems. The partial melting temperature decreases with increasing of $Na/(Na+Ca+K)$ of the bulk rock compositions in the MnNCKFMASH system. The host rocks have melted ca 15 vol.% in the MnNCKFMASH system at peak metamorphic conditions ($634 \pm 62^\circ C$ and 4.8 ± 1.3 kbar), but partial melting have not occurred in KFMASHTO system. Based on calculations of sillimanite isograd in different systems and sillimanite modal proportion, prismatic and rhombic sillimanite and gahnite porphyroblasts including prismatic sillimanite inclusion probably have resulted from pressure and temperature increasing through partial melting (from $550 \sim 600^\circ C$, $2.0 \sim 3.0$ kbar to $700 \sim 750^\circ C$, $5.0 \sim 7.0$ kbar), furthermore have experienced N-S then W-E crustal shortening during D_1 and D_2 deformation. Consequently, Zinc mineralization related to gahnite growth occurred during D_2 and was redistributed and upgraded by partial melting and retrograde metamorphism into structural and rheological sites during shearing in D_3 .

Key words : Ag-Pb-Zn cannington deposit, gahnite, sillimanite, THERMOCALC, partial melting

서론

캔닝턴(Cannington) 은(Ag)-납(Pb)-아연(Zn) 광산(동경 $140^\circ 55'$, 남위 $21^\circ 52'$)은 호주 퀸즈랜드주 마운트 아이자(Mount Ias) 지역 남동 가장자리에 위치한다(그림 1). 마운트 아이자 지역은 세계적으로 경제적인 금속 광상이 밀집되어 있는 지역 중 하나이다. 이 지역은 3가지 주요 층서학적과 지질구조학적 암군으로(terrane) 나뉜다. 가장 오래된 중부 칼카둔-리치하트(Kalkadon-Leichharte) 습곡대는 서부와 동부 습곡대 중간에 위치하며(그림 1), 이 지역들은 다변형/다변성된 초기-중기 원생대 암석으로 특징 지워진다. 동부 습곡대의 동남쪽에 위치하는 캔닝턴 광상은 20~60 m 두께의 백악기 퇴적암으로 덮여져 있기 때문에 야외에서 선캠브리아기 암석 내에 부존하는 광체(ore body)를 발견할 수 없었다. 그러나 1989년 고해상도의 항공 자력이상 측정 방법과 시추 코아로부터 얻은 암석들의 암석 화학 분석치를 통해 백악기 퇴적층 아래에서 납 15%, 아연 0.6%, 그리고 은 870 ppm/톤을 함유한 광체를 발견하였다(Williams *et al.*, 1996).

캔닝턴 광상은 호주 뉴사우스 웨일즈(New

South Wales) 주에 위치한 브로큰 힐(Broken Hill) 광산과 많은 유사성을 보인다. 브로큰 힐 광산은 은-납-아연 광화작용의 대표적인 광산으로, Broken Hill-type (BHT) 광산으로 알려져 있다. 이 광산 유형은 주변암이 엽상 세일인 형태인 SEDEX (Sedimentary Exhalative) 유형이나, 탄산염암의 치환 형태인 아이리쉬(Irish) 유형과는 다른 다음과 같은 특징들을 보인다(Parr and Plimer, 1993; Walters, 1998). BHT 광산은 (a) 흔치 않은 Fe-Mn-Ca-F-Si가 풍부한 스카르과 유사한 광물조합을 보이는 광화작용, (b) 후기 변성교대작용과 최고 변성광물 조합을 보여주는 복잡한 공생 관계, (c) 광화작용은 변성퇴적암 내에서 발생하지만, 각섬석과 공간적으로 밀접한 관계, 그리고 (d) 상부 앵피볼라이트상과 백립암상에 해당되는 고온 변성작용 그리고 다변형 작용 같은 특징을 보인다.

연구 목적은 캔닝턴 광산의 모암에서 산출되는 변성광물 규선석, 석류석, 아연-침정석의 산출 상태와 미세구조를 관찰하여, 연구 지역의 아연-침정석의 성장과 연관된 모양의 변성작용의 특징을 알아보고자 한다. 그리고 궁극적으로 이들 변성작용, 부분용융과 아연-광화작용과의 관계성에 대해 논의하고자 한다.

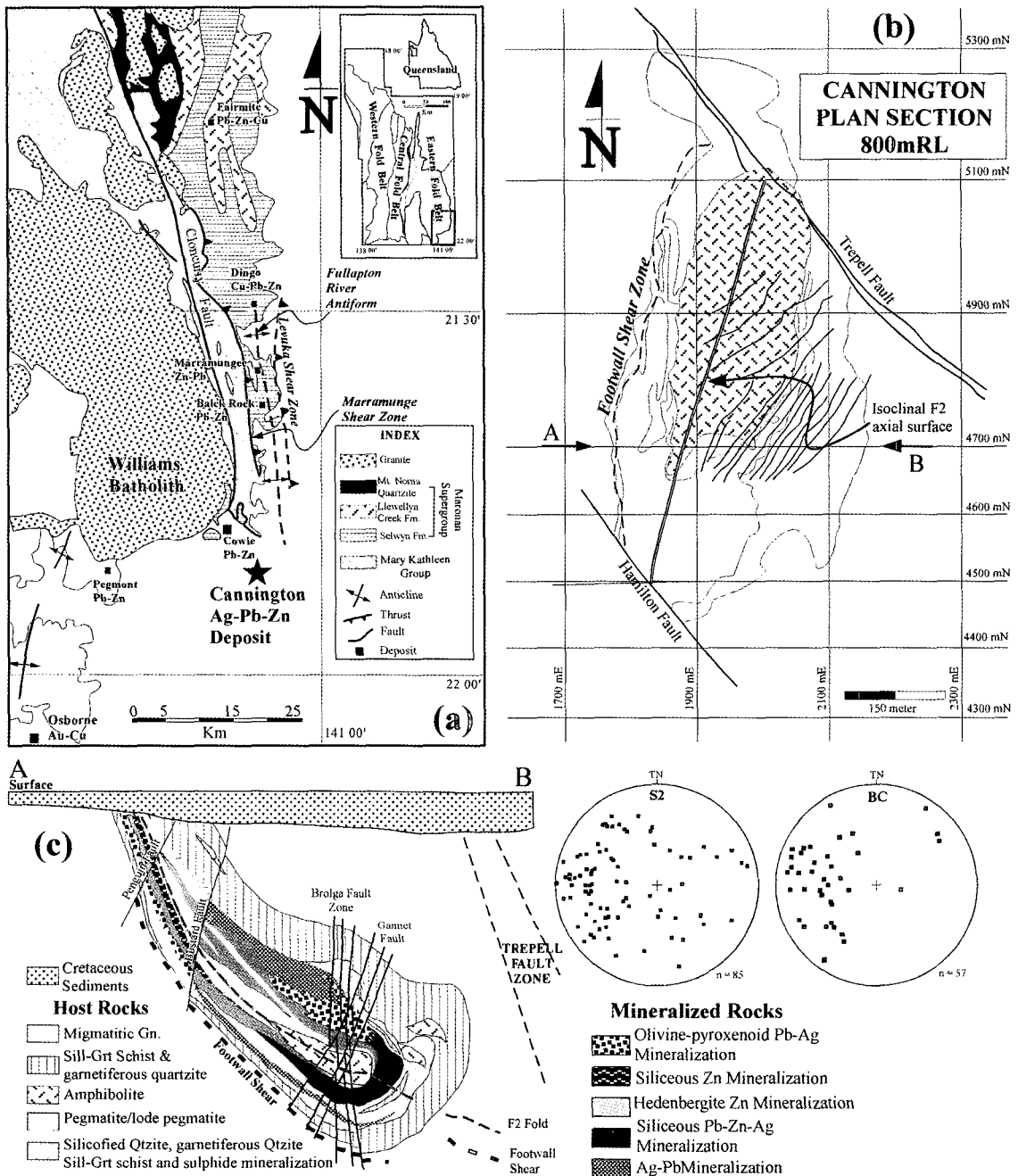


Fig. 1. (a) Location and geological setting of the Cannington deposit compiled from Bureau of Mineral Resources mapping (Selwyn and Kuridala extended 1:1,000,000 sheets). (b) Plan view of Proterozoic basement geology at the Cannington deposit (Phanerozoic cover removed; BHP data), and (c) Generalized cross section (A-B) showing the spatial arrangement of lodes and mesoscopic structures. Poles to S2 and compositional layering (BC) around the synformal fold (F2) are plotted on lower hemisphere equal area stereographic projections, and are from underground and diamond drill core.

지질개요 및 지질구조

캔닝턴 광상의 모양은 마로난(Maronan) 누층군에(1.67 Ga) 속하는 미그마타이트, 흑운모-규선석-석류석 편마암, 흑운모-규선석 편암, 그리고 각섬암으로 구성되어 있다(그림 1; Beardsmore *et al.*, 1988). 미그마타이트와 호상 편마암은 우흑대와 우백대로 구성된 분화된 성분층리(compositional layers; BC in 그림 1c)를 보인다. 각섬암은 석류석 반상변정과 흑운모를 함유하고 있으며, 부분적으로 엽리가 발달해 있다. 각섬암은 광화된 암석에 의해 잘려져 있거나 전단 접촉 관계를 보인다. 캔닝턴 지역의 최고 변성작용은 규선석, K-장석, 각섬석, 사장석 광물조합과 부분용융을 근거로 상부-엠피블라이트 변성상을 나타내며, 변성 온도-압력은 650~690°C and 4±1 kbar이다(Mark *et al.*, 1998).

캔닝턴 광산은 중간을 자르는 트라펠(Trepell) 단층에 의해 남부대와 북부대로 구분되며 남부광산의 전체적인 지질구조는 서남서 방향으로 기울어진 향사성 등사 습곡이다(그림 1b). 습곡의 핵에는 각섬암이 분포하고, 주변은 습곡에 의해 광화대가 반복되어 분포한다. 이 광상은 적어도 4번의 변형작용에 영향을 받은 것으로 알려져 있다(Gray, 1994; Walter and Bailey, 1998). D₁ 변형작용은 규선석 엽리의 발달과 부분 용융으로 특징 지워지고, D₂ 동안에 남-북으로 배열된 등사 습곡과 습곡축 면에 평행한 엽리가 발달했다(S2 in 그림 1c). D₃의 특징은 개방 습곡의 형성과 D₂ 엽리의 파랑 엽리화이고, D₄는 취성 변형작용으로(단층 형성) 특징 지워진다. 은-납-아연 광체는 등사 습곡의 상반과 하반에서 반복적으로 산출되며, 하반의 최하부는 전단대(foot wall shear zone)와 해밀튼(Hamilton) 단층에 의해 단절 있다(그림 1c).

연구방법

야외 노두가 없는 지역이므로 시료는 대부분이 정향된 시추 코아로부터 채취하였고, 이들로 부터 얻은 지질 구조 및 암석학적 정보를 이용하여 지질 평면도와 단면도를 작성하였다(그림 1b, c). 암석의 화학성분은 James Cook University 내에 있는 Advance Analytical Centre (AAC)에서 X-선 형광분광기(모델 Siemens SRS3000)를

Table 1. Bulk rock chemical analyses of samples from metapelitic rocks.

Sample No.	CAD61 -557	CAD420A -267	KU3
SiO ₂	56.19	64.28	60.92
TiO ₂	0.60	0.74	0.64
Al ₂ O ₃	17.07	16.72	19.87
Fe ₂ O ₃	1.29	0.79	0.79
FeO	11.60	7.14	7.14
MnO	0.29	0.13	0.29
MgO	0.90	2.21	0.97
CaO	1.56	0.41	1.10
Na ₂ O	0.65	1.48	0.39
K ₂ O	7.33	4.55	5.07
P ₂ O ₅	0.78	0.09	0.16
SO ₃	0.04	bd	bd
LOI	0.99	1.95	3.24
Total	99.29	100.48	100.58
A ^a	-0.556	0.111	0.214
A ^b	-1.302	-0.083	0.059
XFe ^c	0.879	0.644	0.805
N/N+K ^d	0.119	0.331	0.105
N/N+K+C ^e	0.090	0.301	0.079

^a and ^b calculated from molecular percent of the oxides as follows: ^a, A = (Al₂O₃-3K₂O) / (Al₂O₃-3K₂O+FeO+MgO); ^b, A = (Al₂O₃-3K₂O-CaO-Na₂O) / (Al₂O₃-3K₂O-CaO-Na₂O+FeO+MgO). ^c, X_{Fe} = FeO / (FeO+MgO), ^d, N / N + K = Na₂O / (Na₂O+K₂O); ^e, N / N+K+C = Na₂O / (Na₂O+K₂O+CaO)

이용하여 분석하였다(표 1). 광물의 화학조성은 전자현미분석(모델 JEOL-840A)을 사용하여 분석하였다. 분석조건은 계수 시간은 50초, 전류는 20 nA, 가속전압은 15 kV 그리고 빔의 직경은 3~5 μm이다. 최고 변성 온도-압력 조건은 각섬석-석류석-사장석 화학 성분을 프로그램 THERMOCALC의 평균 온도 압력 모드를 이용하여 계산하였다. 석류석, 각섬석, 사장석의 화학조성과 그들의 위치는 부록(그림 A; 표 A)에 정리하였다.

온도-압력 가상평행도(pseudosections)는 규선석을 함유하는 변성 광물의 조합과 용융의 안정도를 알아보기 위해서 프로그램 THERMOCALC

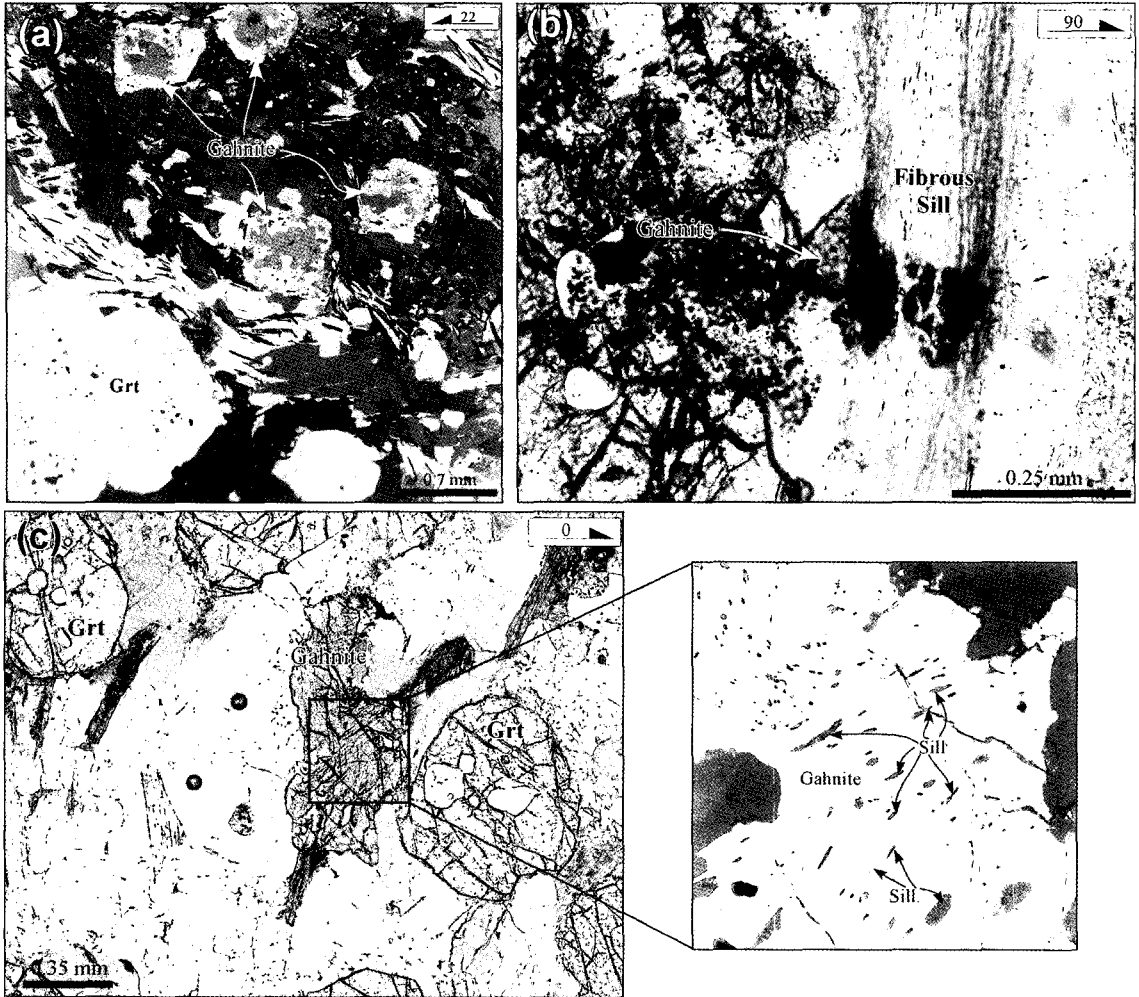


Fig. 2. Photomicrographs and back scattered images (BSI) of gahnite occurrence. (a) BSI of gahnite porphyroblasts in sample CAD61 (557) that have altered by plagioclase and quartz. (b) Gahnite strongly dissolved by fibrous sillimanite in sample KU14. (c) Gahnite porphyroblast in sample KU14 preserved fibrous sillimanite inclusions. All photos are taken from vertical thin sections with single barbed arrows showing strike and way up, and under plane polarized light (PPL).

(version 3.1; Powell and Holland 1988; Powell *et al.*, 1998)을 이용하여 4개의 화학 시스템 즉, $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (KFMASH), $Na_2O-CaO-KFMASH$ (NCKFMASH), $MnO-NCKFMASH$ (MnNCKFMASH) 그리고 $KFMASH-TiO_2-Fe_2O_3$ (KFMASHTO) 하에서 계산하였다(예, White *et al.*, 2000; White *et al.*, 2001; White *et al.*, 2002).

아연-침정석, 규선석, 석류석의 공생관계

아연-침정석(Gahnite; Zn-Spinel)

침정석 광물군에 속하는 아연-침정석은(Zn, Fe, Mg, Mn) $(Al, Fe^3)_2 O_4$, 화학적 풍화작용에 강하고, 아연 광화작용의 지시자로 사용하고 있다. 캔닝턴 지역에서 산출되는 아연-침정석은 규선석, 석류석, 흑운모, 사장석과 공생관계를 보이며 반상 변정으로 산출된다(그림 2a). 아연-침정

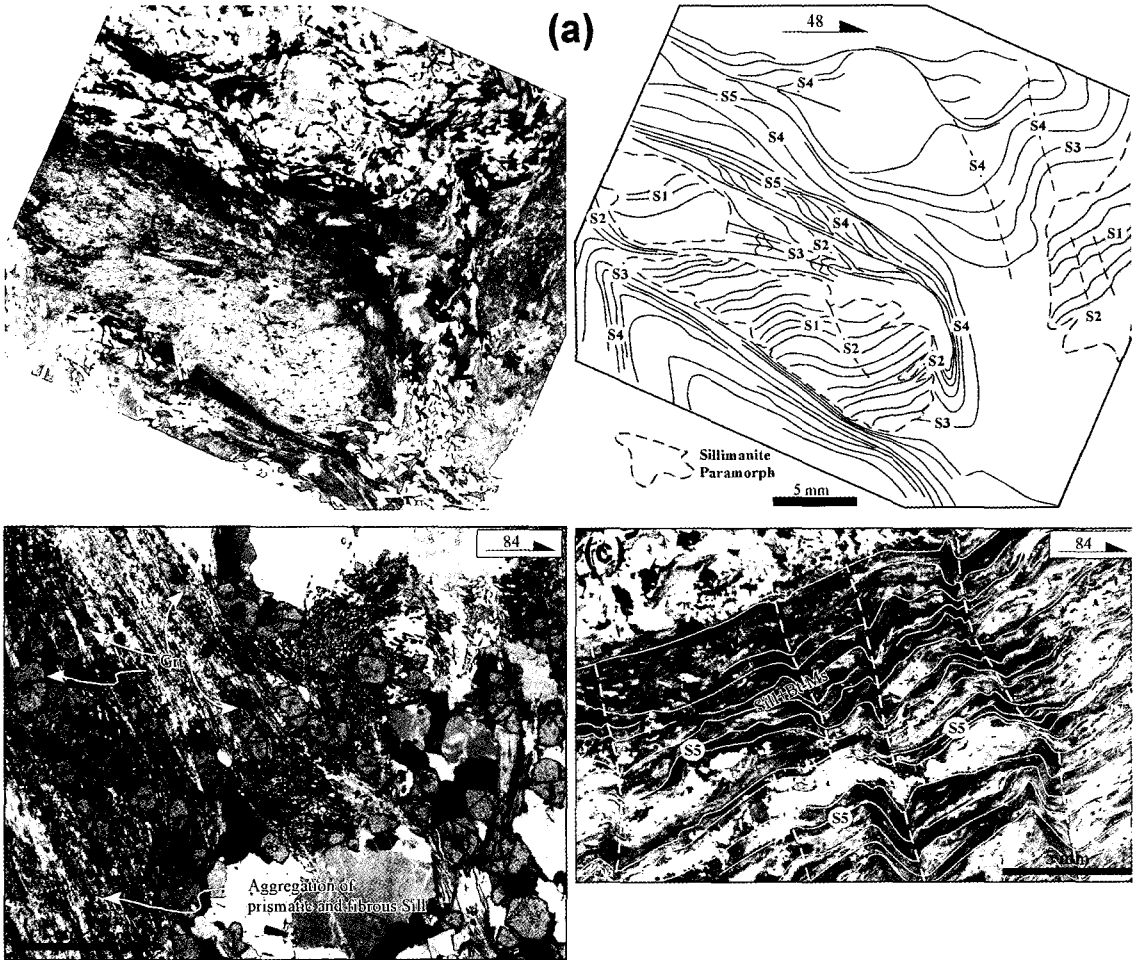


Fig. 3. Photomicrographs of sillimanite occurrences. **(a)** Sillimanite (rhombic) paramorph after andalusite in sample CAD420A (267). **(b)** Aggregation of crenulated and folded prismatic and fibrous sillimanite that dissolved garnet porphyroblasts in sample CAD103(293). **(c)** Crenulated fibrous sillimanite with biotite and muscovite in sample CAD252 (562). All photos are taken from vertical thin sections with single barbed arrows showing strike and way up, and under plane polarized light (PPL).

석은 섬유상 규선석에 의해 잘려있거나 용해되어 나타난다(그림 2b). 어떤 아연-철정석은 침상 내지 주상의 규선석을 내부 포획 광물로 가지고 나타나고(그림 2c), 휘어진 형태의 내부 엽리를 보인다. 또한 이 광물은 BHT의 광화작용을 지시하는 중요한 광물 중 하나이다(Mark, 1993; Waters and Bailey, 1998; Giles, 2000).

규선석

규선석은 광상 주변에 있는 대부분의 모암에

서 산출되며, 그들의 결정 형태에 따라 세 가지로 구분된다. 첫번째는 능면상 또는 주상의 형태로 기질부에서 그리고 다형가상(paramorph)으로 산출된다(그림 3a). 이 다형가상 내에 규선석은 단결정이 아니라 여러 능면상 규선석 집합체로 나타나며, 이는 홍주석 반상 변정이 나중에 규선석으로 변이된 것으로 알려져 있다(Mark *et al.*, 1998). 이 다형가상 내의 능면상 규선석은 흑운모와 같이 정향배열 되어있고, 기질부에서 발달된 파랑엽리화된 또는 습곡된 주상과 섬유상 규선석의 집합체에 의해 잘려져 나타난다(그림 3a).

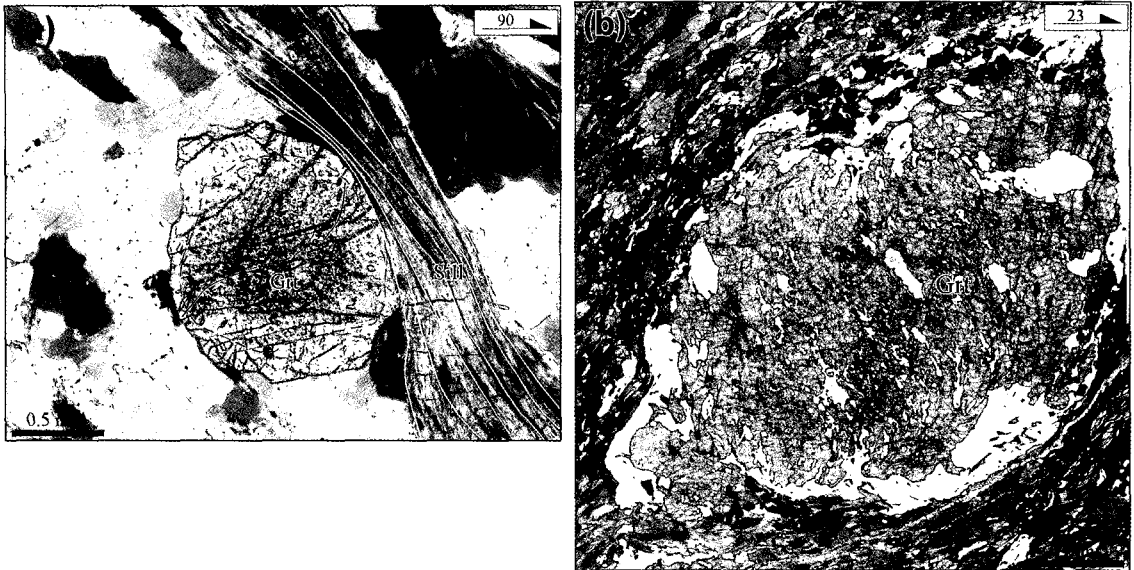


Fig. 4. (a) Garnet porphyroblast shows two growth zones, inclusion-rich core and poor rim, and was strongly dissolved by sillimanite in sample KU3. (b) Garnet porphyroblast in amphibolite (sample CAD401 (421)) display sigmoidal inclusion trails composing biotite, hornblende, ilmenite, magnetite, apatite that have truncated by the matrix foliation. All photos are taken from vertical thin sections with single barbed arrows showing strike and way up, and under plane polarized light (PPL).

두번째 산출 형태는 주상과 섬유상 규선석의 공생이다(그림 3b). 이들은 광상 모암에서 주엽리를 구성하고 있으며, 성분 엽리와 거의 평행하게 산출되기도 한다. 마지막 산출 유형은 단지 섬유상의 규선석이다(그림 3c). 이 형태의 규선석은 흑운모와 함께 수평 엽리를 구성하며, 성분엽리를 절단하며 나타난다.

석류석

석류석은 모암인 편마암과 편암 내에서 반상 변정으로 산출된다. 이 반상 변정의 크기는 수 mm에서 수 cm로 다양하게 나타나고, 두 개의 성장 분대, 즉 내부 포획 광물이 풍부한 중앙부와 반대의 외곽부(그림 4a)로 구분된다. 각섬암에 산출되는 석류석은 S 또는 Z자 형태의 내부 엽리를 가지고 있으며, 이들은 석영, 흑운모, 각섬석, 티탄철석, 자철석 그리고 인회석으로 구성되어 있다(그림 4b). 석류석-흑운모 편암에서 석류석은 주상과 섬유상의 규선석에 의해 용해되어 나타나고(그림 4a), 이것은 나중에 일어난 전단작용의 효과로 알려져 있다(Giles, 2000; Roache,

2004). 석영과 자철석이 풍부한 암석에서 일부 석류석 결정들은 전기석 그리고 자철석+금홍석에 의해 치환되어 있다.

석류석과 아연-침정석의 미세구조

석류석과 아연-침정석 반상변정은 내부에 S자 또는 Z자 형태의 내부 엽리가 발달해 있고(그림 4), 이들의 형태 변화를 관찰하여 내부엽리 변곡축(FIA; Foliation Intersection/inflexion axes)을 측정하였다. 이 방법은 90년대 중반에 Tim Bell (1995)과 그의 연구팀에 의해 개발되었고, 자세한 측정 방법은 Bell *et al.* (1995, 1998), 그리고 Kim (2001), Kim과 Bell (2004) 논문에서 다루었다. 석류석과 아연-침정석의 상대적인 성장 시기는 FIA 측정 위치를 이용하여 결정할 수 있었다. 즉, 반상 변정 중앙에서 측정된 FIA는 외각부에서 형성된 것보다 먼저 형성되었음을 의미한다. 또한 FIA의 선주향과 수직인 방향은 압축 변형 방향을 지시한다(Bell *et al.*, 1995, 1998).

총 14개의 시료로부터 19개의 FIA를 석류석과 아연-침정석으로부터 측정하였고, 두개의 set

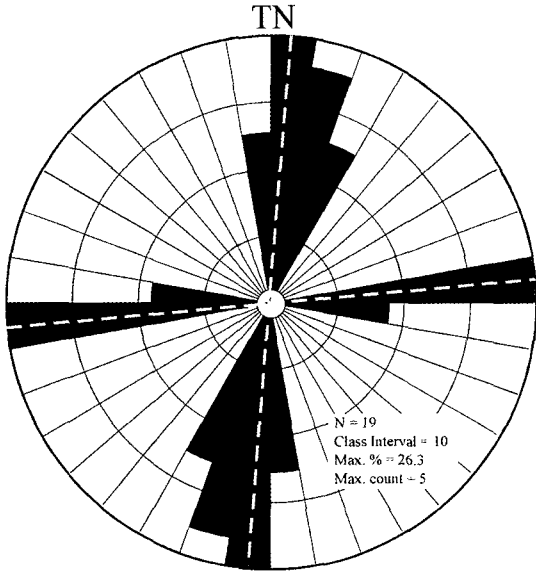


Fig. 5. Rose diagram showing for total 19 FIA trends measured from garnet and gahnite porphyroblasts. TN., True North.

(동서와 남북 FIAs)으로 구분하였다(그림 5; 표 2). 석류석의 FIA 자료는 동서 방향의 FIA가 남북 방향보다 먼저 형성되었음을 지시하지만, 아연-침정석은 오직 남북 방향의 FIA만 가지고 있다. 따라서, 석류석은 남북과 동서 방향의 압축작용으로 변형 작용동안 형성되었음을 지시하고, 반면에 아연-침정석은 동서 방향의 압축 작용 동안에만 성장했음을 알 수 있다. 이와 같은 FIA의 상대적인 형성시기는 연구 지역과 같은 시기의 원생대 지구조운동에 의해 영향을 받은 지역인 오스본 광상 지역(Sayab Mohammad, pers. comm. 2004)과 그리고 조지타운 지역(Cihan, 2004)에서도 일정하게 나타난다.

온도-압력 가상평형도(Pseudosection)와 변성작용

규선석 다형가상과 아연-침정석을 함유하는 3개의 시료에 대해 MnNCKFMASH과 KFMASHTO계 하에서 P-T 가상평형도를 계산하였다(그림 6). 이 도표는 각 계에서 열역학적으로 안정한 광물 조합들의 분포를 보여주고, 색이 어두운 부분이 자유가 높음을 지시한다. 이 단락에서는 화학 계의 변화에 따른 규선석의 안정영역과 부

Table 2. FIA trends of garnet and gahnite for the area in the Cannington deposit

Sample No.	Rock type	Garnet		Gahnite
		core	rim	
KU3	Banded Gneiss	95		
KU14	Sill-Bt-Ms Schist	0		
KU14-1	Sill-Bt-Ms Schist	0		
KU17-1	Amphibolite	15	15	
CAD61 (557)	Banded Gneiss	352		
CAD61 (561)	Banded Gneiss	350		0
CAD401 (177)	Sill-Bt-Ms Schist	85		
CAD401 (192)	Amphibolite	20	20	
CAD410 (68)	Sill-Bt-Ms Schist	10		
CAD410 (421)	Amphibolite	83	18	
CAD552 (132)	Banded Gneiss	80		
CAD552 (138)	Amphibolite	0		
CAD552 (267)	Amphibolite	7		
CAD552 (268)	Amphibolite	80		
CAD552 (272)	Amphibolite	80		

분 용융의 온도와 압력 조건에 대해 알아 보고자 한다.

온도-압력 가상평형도

시료 CAD61 (557)에서, 규선석은 2개의 화학계 하에서 모두 한정된 범주에서 안정되며, 석류석, 흑운모, 백운모, K-장석, 사장석, 티탄철석 그리고 자철석과 같이 산출된다(그림 6a, b). KFMASHTO계에서 이 광물조합의 안정 온도와 압력(600~760°C, 2.0~7.5 kbar) 영역은 Mn-NCKFMASH계(620~680°C, 2.2~4.5 kbar)에서 보다 넓게 나타난다. MnNCKFMASH과 KFMASHTO계에서 부분 용융은 압력이 4.0 kbar일 때 각각 약 660°C와 725°C에서 일어난다.

시료 CAD420 (267)에서 규선석은 넓은 온도-압력 범주에서 석류석, 흑운모, 백운모, 사장석, K-장석, 티탄철석 그리고 자철석과 같이 산출된다(그림 6c, d). 규선석은 낮은 압력 하에서 근칭석이 형성됨에 따라 소멸되기 시작한다. Mn-NCKFMASH 계에서 부분 용융이 시작되는 온도와 압력(650°C, 4 kbar)은 KFMASHTO (720°C,

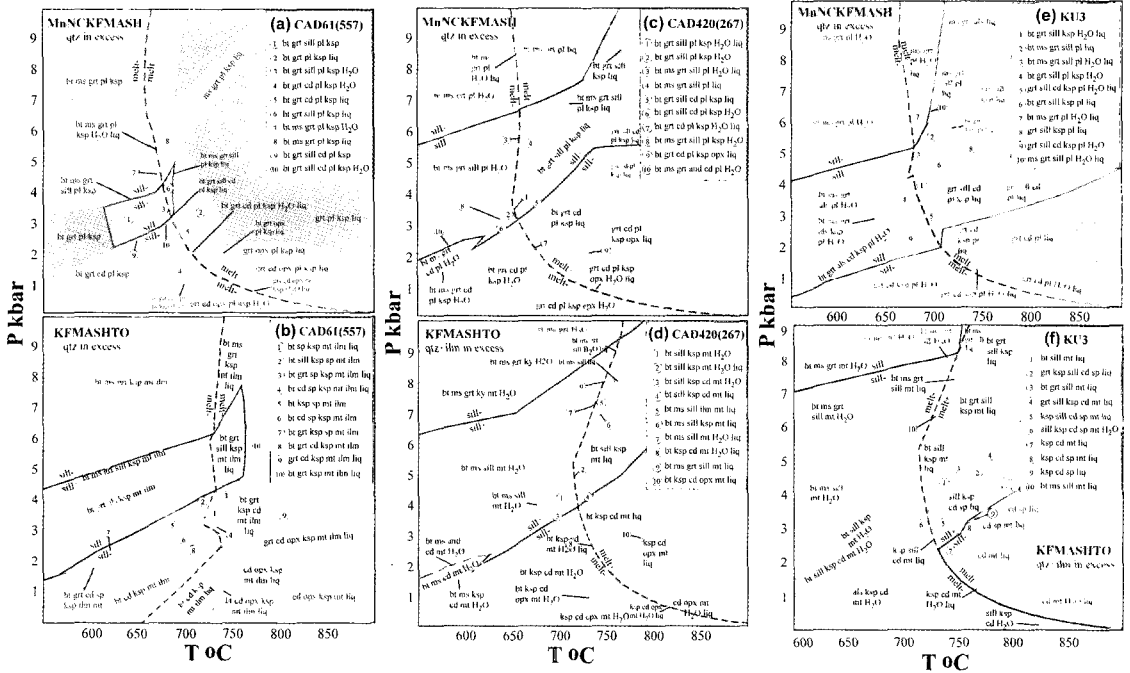


Fig. 6. Calculated P-T pseudosections in MnNCKFAMSH and KFMASHTO systems for (a and b) sample CAD61 (557), (c and d) sample CAD420 (267), (e and f) sample. Boundaries delineating the appearance or demise of sillimanite and melt phases have been highlighted. All mineral abbreviations from Kretz (1983).

4 kbar)계에서 보다 약 70°C 낮다(그림 6c, d).

시료 KU3에서, 규선석은 넓은 온도-압력 범주에서 안정하게 산출된다. MnNCKFAMSH계에서는 근청석의 형성됨에 따라 소멸(그림 6e, f) 되기 시작하지만, KFMASHTO계 하에서 규선석은 낮은 압력 조건에서 근청석과 공생한다. KFMASHTO계에서 부분 용융은 720°C/4.0 kbar 정도에서 일어나고, 이것은 MnNCKFAMSH계에서 보다 약 50°C 정도 높다.

최고 온도-압력 조건

각섬석-석류석-사장석의 화학 성분과 THERMOCALC 프로그램을 이용하여 측정한 온도-압력 조건은 평균 $634 \pm 62^\circ\text{C}$ 그리고 4.8 ± 1.3 kbar이다. 이것은 기존의 연구 결과(Mark *et al.*, 1998; Giles, 2000)와 일치하며, 표 3에 정리하였다.

해석 및 토의

규선석의 결정 형태와 부분 용융

규선석은 캔닝턴 광상 주변암에서 흔히 산출되며, 변형-변성작용의 역사를 규명하는데 중요한 광물로 사용하였다(예, Musmeci, 2002; McLelland *et al.*, 2002). 그림 7a에서는 시료 KU3에 대해 4개의 다른 화학계, 즉 KFMASH, NC-KFMASH, MnNCKFAMSH, 그리고 KFMA-SHTO, 하에서, 규선석의 안정영역의 변화를 보여준다. 낮은 압력 하에서 규선석의 등변성도선은 비교적 일정하지만, 높은 압력 범주에서는 다소 변화를 보인다. MnNCKFAMSH계에서는 규선석 등변성도선이 약 4.5 kbar/650°C에서 나타나고, KFMASHTO계에서는 약 7.5 kbar/650°C에 놓인다. 이것은 암석의 화학성분 중 Na/(Na+K)와 Fe/(Fe+Mg) 비의 변화와 관계를 보인다(그림 7b, c). 높은 K₂O, CaO 그리고 FeO 함량을 보이는 시료 CAD61 (557)에서 규선석은

Table 3. P-T conditions for three samples calculated using average P-T mode in THERMOCALC and conventional thermobarometers

Sp. No.*	site	Gr ^a		Pl ^b		Hb ^c		THERMOCALC			
		F/(F+M)	X _{Ca}	X _{An}	F/(F+M)	Average P-T ±sd (2 s)	Cor. ^d	Sigfit. ^e	Remark ^f		
CAD401 (192)	1	0.861	0.196	0.517	0.625	669±57	5.9±1.4	0.630	0.77(1.61)	1,2,3,4,5	
	2	0.869	0.196	0.464	0.652	695±88	4.8±1.2	0.414	0.68(1.73)	1,2,3,6	
	3	0.878	0.189	0.464	0.653	653±58	4.7±1.3	0.625	0.93(1.61)	1,2,3,4,5	
	4	0.881	0.187	0.536	0.624	605±55	4.9±1.1	0.578	0.74(1.61)	1,2,3,4,5	
	5	0.897	0.195	0.535	0.608	561±71	5.6±1.8	0.635	1.48(1.61)	1,2,3,4,5	
	6	0.870	0.178	0.486	0.636	625±76	4.2±1.2	0.440	0.90(1.73)	1,2,3,6	
	7	0.872	0.183	0.471	0.634	625±57	4.0±1.1	0.574	1.02(1.61)	1,2,3,4,5	
	8	0.863	0.182	0.507	0.612	651±57	4.9±1.3	0.630	0.89(1.61)	1,2,3,4,5	
	9	0.865	0.157	0.507	0.612	632±58	4.2±1.2	0.567	0.93(1.61)	1,2,3,4,5	
	10	0.841	0.175	0.529	0.643	641±53	5.4±1.3	0.634	1.01(1.61)	1,2,3,4,5	
	11	0.878	0.194	0.499	0.627	652±58	5.2±1.3	0.629	0.86(1.61)	1,2,3,4,5	
CAD552 (267)		0.992	0.238	0.313	0.618	581±55	4.7±1.2	0.617	0.590(1.61)	1,2,3,4,5	
CAD552 (272)		0.904	0.152	0.340	0.724	655±69	3.6±1.3	0.497	0.90(1.61)	1,2,3,4,5	
Independent equilibria ^g											
(1)	2py + 4gr + 3ts + 12q = 3tr + 12an					(4)	3tr + 6parg + 18an = 4py + 8gr + 6ts + 3gl				
(2)	6tr + 21an = 10py + 11gr + 27q + 6H ₂ O					(5)	3tr + 3ts + 6parg + 18ab = 4py + 8gr + 12gl				
(3)	6fact + 21an = 11gr + 10alm + 27q + 6H ₂ O					(6)	2parg + 8q = tr + ts + 2ab				

*, Number in parentheses represents strike of thin section. ^a, F/(F+M), Fe/(Fe+Mg) in garnet; X_{Ca}, Ca/(Fe+Mg+Mn+Ca) in garnet; ^b, X_{An}, Ca/(Ca+Na+K) in plagioclase; ^c, F/(F+M), Fe/(Fe+Mg) in hornblende; ^d, correlation; ^e, the number in parenthesis are sigfit for 95% confidence; ^f, the numbers indicate equilibria for calculation of P-T conditions; ^g, End-member abbreviations and formulae given in Powell *et al.* (1998).

매우 한정된 온도와 압력 영역에서 안정하지만, 높은 Na₂O와 MgO, 그리고 낮은 CaO 함량을 보이는 시료 CAD420(267)에서 규선석은 보다 넓은 온도-압력 범주에서 안정하게 산출된다(그림 7b, c).

MnNCKFMASH와 KFMASHTO계 하에서 시료 CAD420 (267)와 CAD61 (557)의 규선석의 모드 조성비 변화 양상은 그림 8에서 보여준다. 두 계에서 최대 규선석 모드 조성비는 용융이 일어나는 전후에 위치하며, 규선석은 용융이 일어나기 전까지는 온도와 압력이 증가하면서 성장하였음을 지시한다. 따라서 시료 CAD420 (267)에서 관찰된 규선석 다형가상(그림 3a)은 약 2.5 kbar, 600°C에서 홍주석-규선석 전이전까지 전진 변성작용에 의해 형성된 것으로 생각된다(그림 8a). 주상 내지는 능면상의 규선석은 연속적인 온도와 압력의 증가와 부분 용융에 의해 성장된 것으로 생각된다. 섬유상 규선석의 상대적인 형성시기는 온도-압력 가상평형도를 이용

하여 구분할 수는 없지만, 이들은 최고 변성 작용 후 후퇴 변성작용으로부터 형성된 것으로 사료된다(예, Giles, 2000; Roache, 2004).

기존의 연구 결과에 의하면, 부분 용융은 최고 변성 온도와 압력 조건, 약 4~6 kbars, 640~690°C; (Mark, 1993; Giles, 2000)에서 일어났다. 그러나 그림 9a에서 보여주듯이 MnNCK-FMASH와 NCKFMASH계에서 부분 용융은 KFMASH와 KFMASHTO계에서 보다 낮은 온도에서 일어난다. 또한 3개의 시료에 대한 부분 용융 온도는 KFMASHTO에서는 일정하지만, MnNCKFMASH 계에서는 암석의 Na/(Na+Ca+K) 비가 증가함에 따라 부분 용융의 온도는 감소하는 경향을 보인다(그림 9b). 시료 CAD61 (557)와 CAD420 (267)의 경우, MnNCKFMASH계에서 부분 용융의 모드 조성비는 최고 온도와 압력 조건 하에서 약 15 vol.%를 보이지만(그림 10a, c), KFMASHTO 계에서는 부분 용융이 일어나지 않음을 보여준다(그림 10b, d). 이와 같은

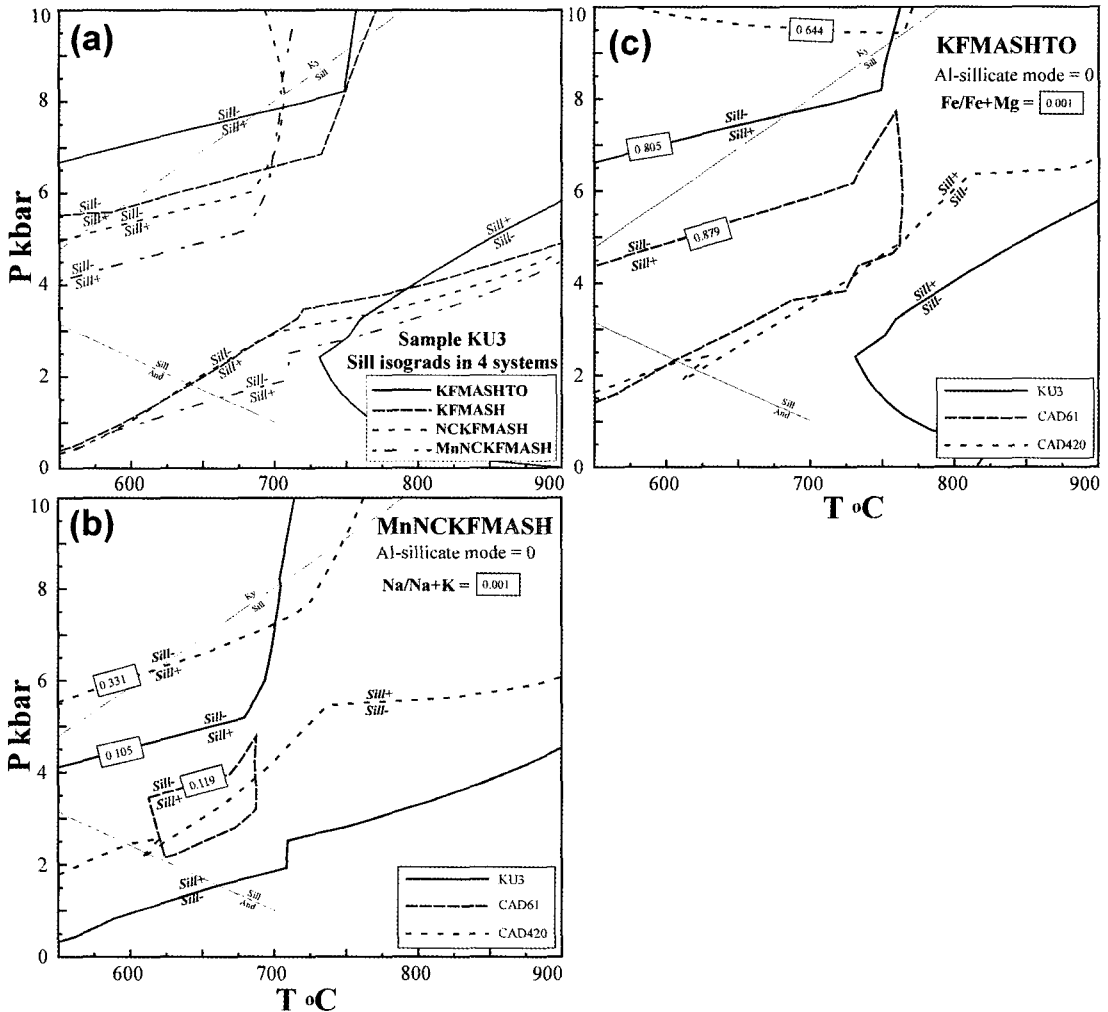


Fig. 7. (a) Sillimanite isograds of sample KU3 in four different systems. (b) Variation of sillimanite isograd of three samples in MnNCKFMASH system. Numbers in boxes indicate Na/(Na+K) ratio. (c) Variation of sillimanite isograd of three samples in KFMASHTO system. Numbers in boxes indicate Fe/(Fe+Mg) ratio.

결과는 Na 함량이 적은 앰피블라이트는 Na, K, Ca 또는 Mn와 같은 성분의 유입 없이는 최고 변성 조건에서 부분 용융이 일어나지 않았음을 지시한다. 따라서 변성 교대작용으로 인한 Na, K, Ca 또한 Mn 성분의 유입은 주로 습곡과 탈파랑엽리화 작용 동안에 일어났고, 이로 인해 국부적으로 형성되어진 공간들은 금속 성분이 농집되는 장소로서의(S. Guy pers. comm., 2004) 역할 뿐만 아니라, 아래에서 토의한 아연-침정석의 성장과도 밀접한 관계가 있다.

N-S와 W-E의 압축 변형작용과 아연 광화 작용의 연계성

호주 마운트 아이자 지역의 동부 습곡대에서 남북 방향과 그 다음 동서 방향으로 압축 변형 작용의 연속성은 본 연구 지역 뿐만 아니라 주변 지역, 즉 Tommy Creek 지역(Hill *et al.*, 1992), Marramungee 지역(Newberry, 1990) 그리고 Soldiers Cap 지역(Loosveld, 1989; Rubenach and Barker, 1998)에서 보고된 바 있다. 동서 압

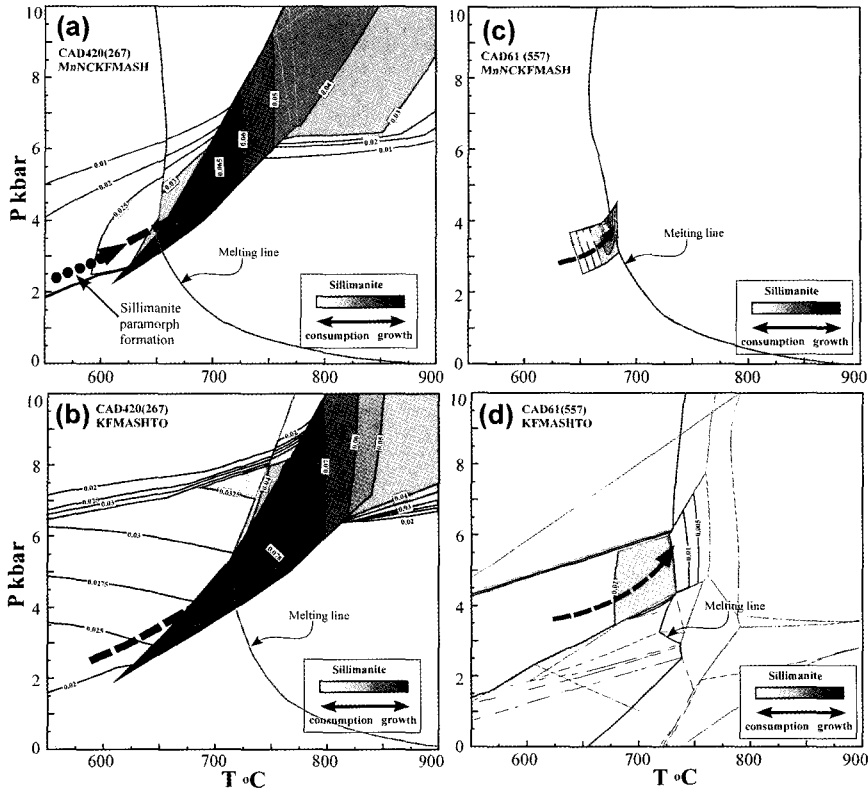


Fig. 8. (a and b) Sillimanite modal proportion of sample CAD420A (267) in MnKFMASH and KFMASHTO systems respectively. (c and d) Sillimanite modal proportion of sample CAD61 (557) in Mn KFMASH and KFMASHTO systems respectively. Black arrows indicate P-T paths for sillimanite growth.

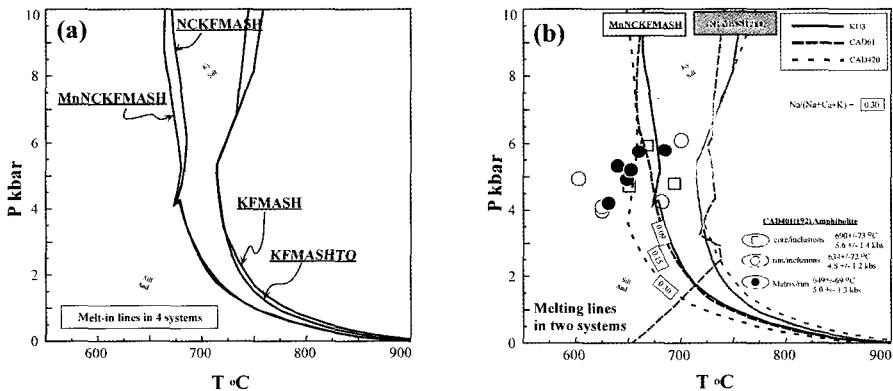


Fig. 9. (a) P-T diagram showing melt-in lines for sample KU3 in different four systems. (b) P-T diagram showing melt-in lines in MnNCKFMASH and KFMASHTO systems for three samples. Open circles and squares, and closed circles indicate P-T conditions with ranges of standard deviation (2) that calculated from garnet-hornblende-plagioclase compositions in sample CAD401 (192) using program THE-RMOCALC. See Fig. A and Table 3 for details.

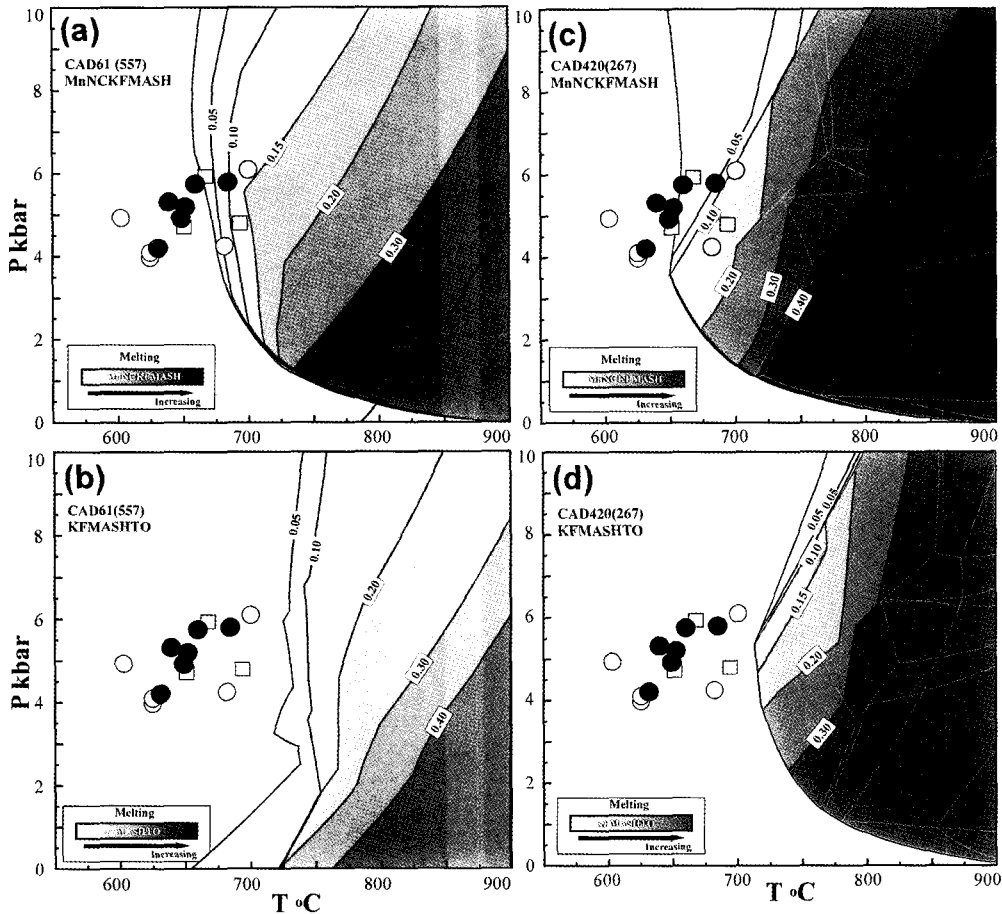


Fig. 10. (a and b) Modal proportion of melt in sample CAD61 (557) in MnNCKFMASH and KFMASHTO systems respectively. (c and d) Modal proportion of melt in sample CAD420 (267) in MnNCKFMASH and KFMASHTO systems respectively.

축방향은 D₂ 동안 형성된 주 습곡작용으로 특징 지워지며, 앞서 있었던 N-S의 압축방향과 구별된다(Cihan, 2004; S. Mohammad, pers. comms, 2004). 남북에서 동서 압축 방향으로 특징 지워지는 변형작용의 형성시기는 기존의 연대측정 결과로부터 약 1.6 Ga을 것으로 생각한다(Loosveld, 1989; Rubenach and Barker, 1998; Newberry, 1990; Hill *et al.*, 1992; Cihan, 2004; S. Mohammad and M. Rubenach, pers. comms, 2004).

남북 방향의 FIA를 함유한 아연-침정석은 동서 압축운동(D₂) 동안에 형성되었을 것으로 생각된다. 따라서 아연 성분은 D₂ 변형-변성작용 동안에 암석 내에 포획되었음을 지시하고, 부

분 용융 작용 또한 아연 광화대를 형성하는데 관여하였을 것으로 생각된다. 위에서 언급한 특성들은 아연 광화대는 후생적(epigenetic)이라는 것을 지시하며(e.g., Richmond *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 1996; Chapman and Williams, 1998), 변성암석학적 그리고 미세구조적 관찰 결과들은 부분 용융 그리고 습곡작용은 주로 D₂에서 D₃ 동안에 일어났음을 알 수 있었다.

결론

1) 연구 지역에서 산출되는 규선석의 세 가지 산출상태와 아연-침정석과의 공생관계는 홍주석과 규선석의 상(Phase) 변화를 야기시킨 변성작

용과 부분용융이 아연 광화작용에 영향을 미쳤음을 지시한다.

2) 석류석과 아연-철정석 반상 변정의 내부 엽리 구조로부터 측정된 내부 엽리 변곡축의 방향과 이들의 상대적 형성시기는 먼저 동서 방향이 형성되고 그 다음 남북 방향으로 변화하였음을 지시한다. 이것은 연구지역의 변성작용 동안 최대 수축 변형 방향은 남북에서 동서 방향으로 이동하였음을 나타내고, 이는 기존의 D₁과 D₂ 변형작용과 일치한다.

3) 따라서 아연-철정석의 성장과 관련된 아연 광화작용은 D₂ 동안에 반시계 방향의 온도-압력 경로를 따라 일어났음을 지시한다. 연구지역에서 부분용융 정도는 모암의 화학성분에 따라 다르며, 변성이질암의 경우 최고 온도-압력 조건 하에서 최고 약 15 vol.% 정도 부분 용융을 경험하였다. 이 부분용융으로 인한 효과는 연구지역의 고철질 암석의 용융을 유발시킬 수 있었으며, 따라서 아연 광화작용은 후기 변형/변성 작용에 의해 재배치 또는 재농집 되어진 것으로 생각된다.

사 사

연구는 호주 과학 재단(Australian Research Council)의 SPIRT 과제(책임연구자; Tim Bell) 지원에 의해 수행되었다. 광산에서 야외조사를 하는데 많은 도움을 주신 BHP Billiton Cannington 관계자, Jeffrey Stuart, Alan Edwards 그리고 Richard Davis께 감사 드린다. 또한 프로그램 THERMOCALC의 사용에 대한 여러 가지를 지적하고 토의해 준 Dr. Richard White, Tom Evans에게도 감사 드린다. 또한 원고의 미비점을 지적하여 주신 양경희 교수님과 박맹언 교수님께 감사 드린다. 마지막으로 이 연구를 수행하는데 필요한 훌륭한 시설을 제공해 준 James Cook University의 School of Earth Sciences와 논문을 마칠 수 있게 여러 정보를 제공해 준 강원대학교 산업광물 은행에게도 감사 드린다

참 고 문 헌

- Beardmore, T.J., Newbery, S.P., and Laing, W.P. (1988) The Maronan Supergroup - An inferred early volcanosedimentary rift sequence in the Mt Isa Inlier, and its implications for ensialic rifting in the middle Proterozoic of northwest Queensland. *Precam. Res.*, 40, 487-508.
- Bell, T.H., Forde, A., and Wang, J. (1995) A new indicator of movement direction during orogenesis: measurement technique and application to the Alps. *Terra Nova*, 7, 500-508.
- Bell, T.H., Hickey, K.A., and Upton, G.J.G. (1998) Distinguishing and correlating multiple phases of metamorphism across a multiply deformed region using the axes of spiral, staircase and sigmoidally curved inclusion trails in garnet. *Jour. Meta. Geol.*, 16, 767-794.
- Chapman, L.H. and Williams, P.J. (1998) Evolution of pyroxene-pyroxenoid-garnet alteration at the Cannington Ag-Pb-Zn deposit, Cloncurry district, Queensland, Australia. *Econ. Geol.*, 93, 1390-1405.
- Cihan, M. (2004) The drawbacks of sectioning rocks relative to fabric orientations in the matrix: A case study from the Robertson River Metamorphics (Northern Queensland, Australia). *Jour. Struc. Geol.*, 26, 2157-2174.
- Giles, D. (2000) Geodynamic setting of Broken Hill Type Mineralisation: the Cannington perspective, unpublished PhD thesis, Monash University, 233 p.
- Gray, D.R. (1994) Structural report on the Cannington Pb-An-Ag deposit, Mount Isa Inlier. Unpublished Report to BHP Minerals.
- Hill, E.J., Loosveld, R.J.H., and Page, R.W. (1992) Structure and geochronology of the Tommy Creek Block, Mount Isa Inlier. In: Stewart A.J. and Blake D.H. (eds.), *Australian Geol. Survey Organisation, Bull.*, 243, 329-348.
- Kim, H.S. (2001) A new approach to distinguishing multiple phases of metamorphism and deformation: Application to the Northeastern Appalachian. *Geo. Jour.*, 5, 65-84.
- Kim H.S. and Bell T.H. (2004) Combining compositional zoning and foliation intersection axes (FIAs) in garnet to quantitatively determine early P-T-t paths in multiply deformed and metamorphosed schist: north central Massachusetts, USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, in press.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, 68, 277-279.
- Loosveld, R.J.H. (1989) The synchronism of crustal thickening and high T/low P metamorphism in the Mount Isa Inlier, Australia: An example, the central Soldiers Cap belt. *Tectono.*, 158, 173-190.
- Mark, G.M. (1993) Pegmatite and partial melting at the Cannington deposit. Unpublished BSc. Honours thesis, Townsville, James Cook University, 131 p.
- Mark, G.M., Philipd, G.N., and Pollard, P.J. (1998) Highly selective partial melting of pelitic gneiss at Cannington, Cloncurry District, Queensland. *Austr.*

- Jour. Earth Sci., 45, 169-176.
- McLelland, J., Goldstein, A., Cunningham, B., Olson, C., and Orrell, S. (2002) Structural evolution of quartz-sillimanite vein and nodule complex in a late-to post-tectonic leucogranite, Western Adirondack Highlands, New York. *Jour. Struc. Geol.*, 24, 1157-1170.
- Musumeci, G. (2002) Sillimanite-bearing shear zones in syntectonic leucogranite: fluid-assisted brittle-ductile deformation under amphibolite facies conditions. *Jour. Struc. Geol.*, 24, 1491-1505.
- Newberry, S.P. (1990) The middle of Proterozoic Maranoan Supergroup, Soldiers Cap Belt, Eastern Mount Isa Inlier; A rationalization of the geology and mineralization of a complexly deformed and metamorphosed terrane. Ph.D. thesis, James Cook University.
- Parr, J.M. and Plimer, I.R. (1993) Model for Broken Hill-type lead-zinc-silver deposits, in Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., *Mineral Deposit Modeling*, Geological Association of Canada Special Paper, 40, 778-790.
- Powell R. and Holland, T.J.B. (1988) An internally consistent dataset with uncertainties and correlation; 3, Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Jour. Meta. Geol.*, 6, 173-204.
- Powell R., Holland T.J.B., and Worley B. (1998) Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Jour. Meta. Geol.*, 16, 577-588.
- Richmond, J.M., Chapman, L.H., and Williams, P.J. (1996) Two phases of garnet alteration at the Cannington Ag-Pb-Zn deposit, NW Queensland: James Cook University of North Queensland Economic Geology Research Unit, Contribution 55. 113-117.
- Roache, T.J. (2004) Shear zone versus fold geometries at the Cannington Ag-Pb-Zn deposit: implications for the genesis of BHT deposit. *Jour. Struc. Geol.*, 26, 1215-1230.
- Rubench, M.J. and Barker, A.J. (1998) Metamorphic and metasomatic evolution of the Snake Creek Anticline, Eastern Succession, Mount Isa Inlier. *Australian Journal Earth Sciences*, 45, 363-372.
- Walters, S.G. (1998) Broken Hill-type deposit. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*. 17, 229-237.
- Walters, S.G. and Bailey, A. (1998) Geology and mineralization of the Cannington Ag-Pb-Zn deposit: an example of Broken Hill-type mineralization in the Eastern succession, Mount Isa Inlier. *Econ. Geol.*, 93, 1307-1329.
- White, R.W., Powell, R., and Clarke, G.L. (2002) The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulite of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system $K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3$. *Jour. Meta. Geol.*, 20, 41-55.
- White, R.W., Powell, R., and Holland, T.J.B. (2001) Calculation of partial melting equilibria in the system $Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ (NCKFMASH). *Jour. Meta. Geol.*, 19, 139-154.
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., and Worley, B.A. (2000) The effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on metapelitic assemblages at greenschist to amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system $K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3$. *Jour. Meta. Geol.*, 18, 497-511.
- Williams, P.J., Chapman, L.H., Richmond, J., Baker, T., Heinemann, M., and Prendergast, W.J. (1996). Significance of Late Orogenic Metasomatism in the Broken Hill-Type deposits of the Cloncurry District, NW Queensland. In, Pongratz, J. and Davidson, G.J., eds., *New Developments in Broken Hill Type deposits*. CODES Special Publication 1, Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, Hobart, 119-132.

2004년 11월 30일 원고접수, 2004년 12월 20일 게재승인.

Table A. Representative analyses of garnet, hornblende and plagioclase

Samples	CAD401 (192)										CAD552	CAD552	
	Garnet										-267	-272	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	36.89	37.73	36.89	37.30	37.11	37.09	37.14	37.37	37.14	37.86	36.80	35.89	36.46
TiO ₂	0.00	0.40	0.08	0.00	0.33	0.00	0.11	0.00	0.10	0.00	0.46	0.21	0.38
Al ₂ O ₃	20.41	20.30	20.21	20.67	20.10	20.60	20.42	20.31	20.64	21.09	19.91	18.64	20.20
FeO	29.10	29.23	29.05	29.16	29.61	30.57	29.88	30.29	29.60	30.11	29.36	20.03	25.91
MnO	3.32	3.18	3.49	4.13	3.44	3.30	3.03	2.87	3.99	2.69	3.49	14.03	8.95
MgO	2.64	2.47	2.27	2.21	1.90	2.56	2.46	2.69	2.59	3.19	2.29	0.94	1.54
CaO	7.05	7.01	6.68	6.69	6.89	6.53	6.54	6.60	5.57	6.39	6.94	8.74	5.30
Na ₂ O	0.58	0.41	0.01	0.00	0.00	0.06	0.07	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.15	0.08	0.04	0.20	0.14	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
TOTAL	99.99	100.88	98.76	100.20	99.58	100.85	99.65	100.13	99.63	101.94	99.25	98.48	98.74
	Cations per 24 oxygens												
Si	5.941	6.007	6.005	5.989	6.008	5.939	5.990	6.000	5.988	5.954	5.974	5.964	5.977
Ti	0.000	0.048	0.010	0.000	0.040	0.000	0.013	0.000	0.013	0.000	0.056	0.026	0.047
Al	3.872	3.808	3.877	3.910	3.834	3.886	3.880	3.842	3.921	3.909	3.810	3.649	3.902
Fe	3.917	3.891	3.952	3.913	4.007	4.092	4.029	4.066	3.990	3.959	3.985	2.783	3.551
Mn	0.453	0.429	0.481	0.561	0.472	0.448	0.414	0.390	0.545	0.358	0.479	1.974	1.242
Mg	0.633	0.585	0.549	0.529	0.459	0.610	0.591	0.644	0.622	0.748	0.555	0.234	0.377
Ca	1.216	1.195	1.164	1.150	1.194	1.119	1.129	1.135	0.961	1.076	1.207	1.556	0.930
Na	0.181	0.126	0.002	0.000	0.000	0.019	0.021	0.000	0.000	0.150	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.031	0.017	0.008	0.041	0.030	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000	0.000
TOTAL	16.214	16.120	16.057	16.060	16.055	16.142	16.067	16.078	16.039	16.179	16.066	16.186	16.025
	Hornblende												
SiO ₂	41.22	41.02	41.40	40.87	41.33	40.65	40.85	40.62	40.73	40.75	42.32	39.77	
TiO ₂	0.91	0.85	0.85	0.67	0.77	1.03	0.78	1.21	1.21	0.74	1.02	0.72	0.39
Al ₂ O ₃	13.72	13.40	13.88	13.92	14.62	13.40	13.28	13.67	13.67	13.77	13.50	9.73	11.02
FeO	21.29	22.93	22.41	21.53	21.17	22.09	22.24	20.89	20.89	22.64	21.35	22.48	25.89
MnO	0.32	0.07	0.35	0.24	0.26	0.30	0.47	0.22	0.22	0.38	0.17	1.34	0.65
MgO	7.17	6.87	6.68	7.29	7.67	7.08	7.21	7.43	7.43	7.06	7.13	7.82	5.53
CaO	11.50	11.40	11.53	11.40	11.57	11.41	11.04	11.24	11.24	11.17	11.27	10.78	10.81
Na ₂ O	1.40	0.82	0.54	1.05	2.13	0.49	0.55	0.65	0.65	0.97	0.91	1.55	1.32
K ₂ O	0.91	0.98	0.92	0.94	0.85	0.99	0.86	0.82	0.82	0.94	0.93	0.24	1.06
TOTAL	98.44	98.34	98.56	97.91	100.37	97.44	97.28	96.75	96.75	98.40	97.03	96.98	96.44
	Cations per 24 oxygens												
Si	6.548	6.560	6.578	6.529	6.441	6.543	6.581	6.537	6.537	6.509	6.562	6.877	6.648
Ti	0.109	0.102	0.102	0.081	0.090	0.125	0.094	0.146	0.146	0.089	0.123	0.088	0.048
Al	2.569	2.525	2.599	2.621	2.685	2.542	2.520	2.593	2.593	2.593	2.562	1.863	2.172
Fe	2.827	3.065	2.976	2.875	2.758	2.972	2.994	2.810	2.810	3.025	2.874	3.054	3.617
Mn	0.044	0.009	0.048	0.033	0.034	0.041	0.063	0.030	0.030	0.052	0.023	0.184	0.092
Mg	1.696	1.636	1.581	1.734	1.780	1.697	1.731	1.781	1.781	1.681	1.709	1.892	1.378
Ca	1.957	1.953	1.961	1.950	1.931	1.966	1.906	1.937	1.937	1.911	1.944	1.876	1.935
Na	0.432	0.255	0.166	0.324	0.644	0.151	0.172	0.202	0.202	0.301	0.283	0.487	0.427
K	0.185	0.201	0.187	0.192	0.168	0.204	0.177	0.168	0.168	0.191	0.192	0.049	0.227
TOTAL	16.367	16.304	16.197	16.338	16.532	16.240	16.239	16.205	16.205	16.351	16.272	16.371	16.545
	Plagioclase												
SiO ₂	55.59	56.22	56.22	54.72	54.37	56.64	54.82	56.36	56.36	55.33	56.24	60.11	59.84
Al ₂ O ₃	26.02	25.77	25.77	27.04	26.64	26.67	27.34	27.19	27.19	27.01	26.96	24.11	24.56
MgO	0.14	0.17	0.17	0.22	0.27	0.39	0.54	0.41	0.41	0.22	0.51	0.44	0.23
CaO	10.03	9.28	9.28	10.35	10.53	9.13	10.33	9.55	9.55	10.24	9.87	6.04	6.42
Na ₂ O	5.05	5.86	5.86	4.84	4.95	5.35	6.30	5.08	5.08	4.92	5.36	7.32	6.89
K ₂ O	0.21	0.11	0.11	0.17	0.17	0.00	0.18	0.07	0.07	0.17	0.16	0.23	0.11
TOTAL	97.04	97.41	97.41	97.34	96.93	98.18	99.51	98.66	98.66	97.89	99.10	98.25	98.05
	Cations per 32 oxygens												
Si	10.255	10.311	10.311	10.067	10.065	10.278	9.936	10.195	10.122	10.167	10.839	10.819	
Al	5.638	5.551	5.551	5.850	5.797	5.686	5.828	5.782	5.782	5.811	5.728	5.094	5.180
Mg	0.040	0.046	0.046	0.062	0.075	0.107	0.148	0.111	0.111	0.062	0.139	0.120	0.063
Ca	2.014	1.852	1.852	2.074	2.123	1.803	2.039	1.880	1.880	2.040	1.941	1.185	1.276
Na	1.835	2.115	2.115	1.756	1.803	1.910	2.249	1.810	1.810	1.774	1.907	2.598	2.481
K	0.050	0.027	0.027	0.040	0.040	0.000	0.042	0.017	0.017	0.041	0.039	0.054	0.025
TOTAL	19.855	19.958	19.958	19.902	19.954	19.834	20.295	19.827	19.827	19.880	19.942	19.889	19.844

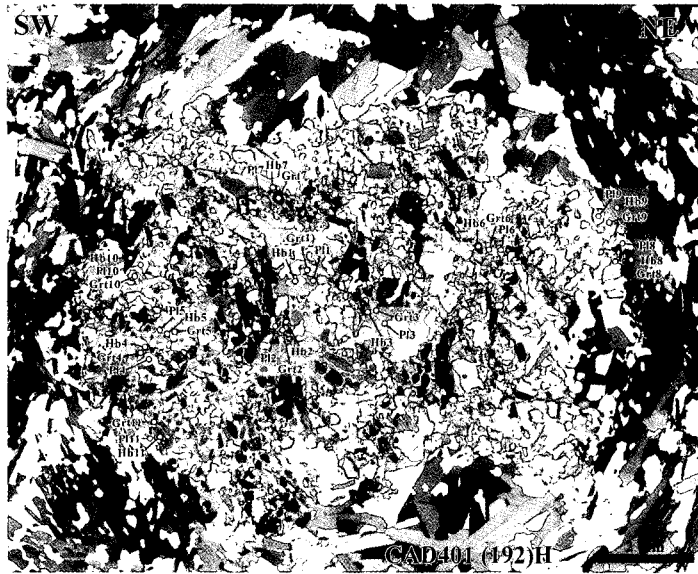


Fig. A. Photomicrograph of garnet porphyroblast in amphibolite (sample CAD401 (192)) showing locations analyzed for calculations of P-T conditions. Horizontal thin section, PPL.